

Images numériques couleur

Julie Delon

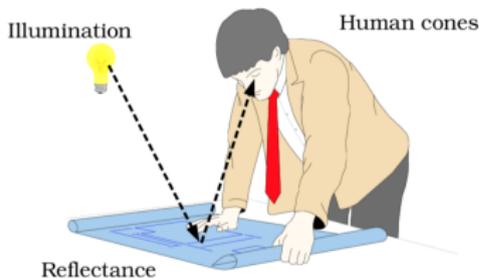
Cours de Master M2

Première partie I

Couleur et perception

Introduction

(a)



(b)

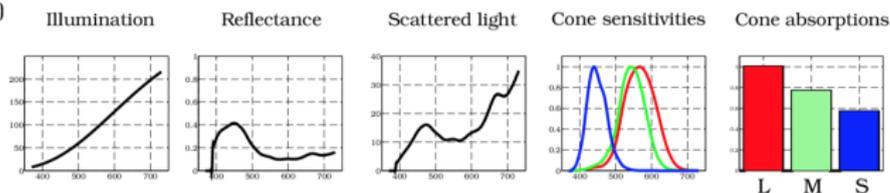


Figure 3.1: Illustration of main components in color image formation. a) Example of light interacting with reflective surface and reaching human retina. b) The plots show scattered light as a product of illumination and reflectance, and the amount of cone absorptions. Image courtesy of [Wandell 1995].

Lumière et illuminants

Spectre visible : longueurs d'ondes entre $\lambda_{min} = 380\text{nm}$ et $\lambda_{max} = 700\text{nm}$.



Illuminant monochromatique : illuminant dont la distribution spectrale est une masse de Dirac (une seule longueur d'onde).

Corps noir à la température T : Objet physique idéal dont le spectre ne dépend que de la température (bonne approximation pour les étoiles).

Distribution

$$I(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1}.$$

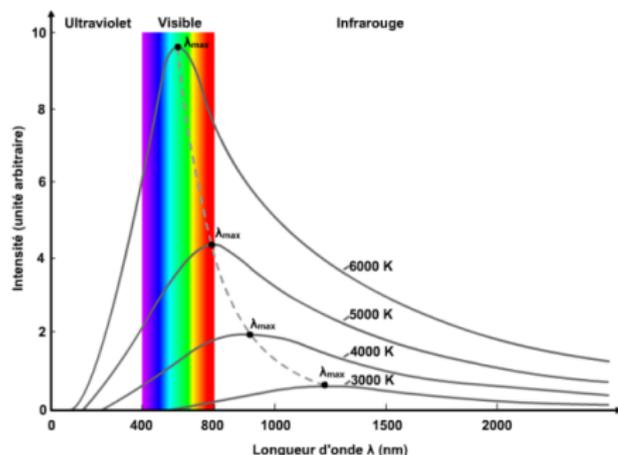


Illustration : F. Bouquet, Univ. Paris Sud

Objets

Réponse spectrale d'un objet $R(\lambda, x, \theta)$, combinaison linéaire de

- une partie lambertienne $R_l(\lambda, x)$,
- une partie spéculaire $R_i(\lambda, x, \theta)$ qui dépend de l'angle θ sous lequel on regarde le point x .

Différents modèles de formation d'image : modèle Lambertien, modèle dichromatique, modèle de Kubelka-Monk.

Pour aller plus loin, voir :

S.A. Shafer, Using color to separate reflection components, *Color. Res. Appl.* 10 (1985), no. 4, 210–218.

J. M. Geusebroek, T. Gevers, and A. W. M. Smeulders, The Kubelka-Munk theory for color image invariant properties, *European Conference on Colour in Graphics*, 2002, pp. 463–467.

Observateur

Hypothèse classique : 3 photorécepteurs de sensibilités spectrales respectives ρ_r , ρ_g et ρ_b

- Oeil des primates : 3 types de cônes (2 pour les mammifères non primates, jusqu'à 5 pour certains oiseaux)
- Capteur photographique classique : 3 filtres (rouge, vert, bleu)

Energies mesurées par les photorécepteurs

$$q_r(x) = \int I(\lambda)R(\lambda, x)\rho_r(\lambda)d\lambda.$$

$$q_g(x) = \int I(\lambda)R(\lambda, x)\rho_g(\lambda)d\lambda.$$

$$q_b(x) = \int I(\lambda)R(\lambda, x)\rho_b(\lambda)d\lambda.$$

Modèle diagonal de Von Kries

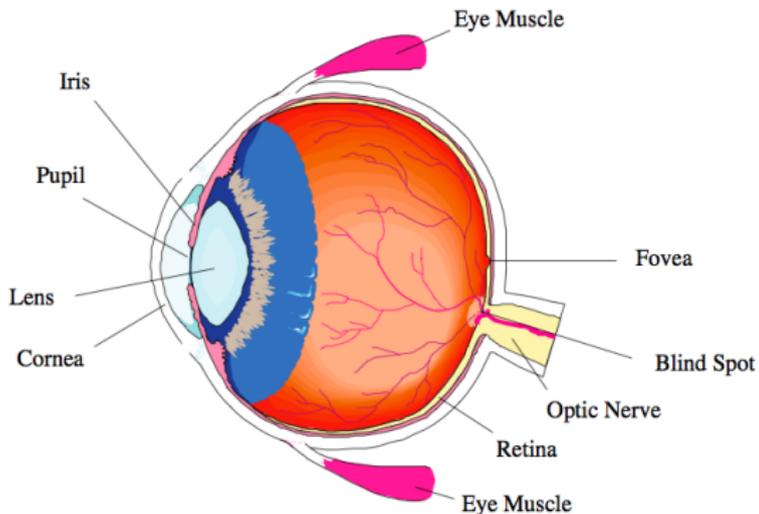
Sous hypothèse lambertienne et en supposant que les sensibilités ρ sont des Diracs (FAUX en général !), on mesure pour un point x le triplet :

$$(R(\lambda_R, x)I(\lambda_R), R(\lambda_G, x)I(\lambda_G), R(\lambda_B, x)I(\lambda_B)).$$

Sous ce modèle, passer d'un illuminant I à un illuminant L revient à multiplier ([modèle de Von Kries](#)) ce triplet par la matrice diagonale

$$\begin{pmatrix} \frac{L(\lambda_R)}{I(\lambda_R)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L(\lambda_G)}{I(\lambda_G)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L(\lambda_B)}{I(\lambda_B)} \end{pmatrix}.$$

Système visuel humain



Fovea : zone de la rétine où la vision est la plus précise. Haute densité de photorécepteurs.

Zone aveugle au niveau du nerf optique.

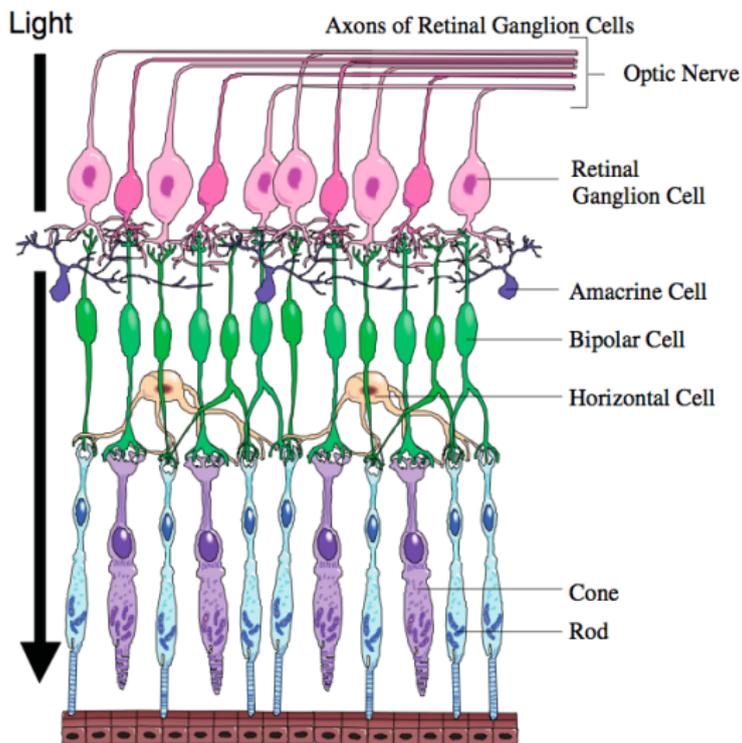
Système visuel humain

(a)



Expérience illustrant l'existence de la zone aveugle.

Cellules de la rétine

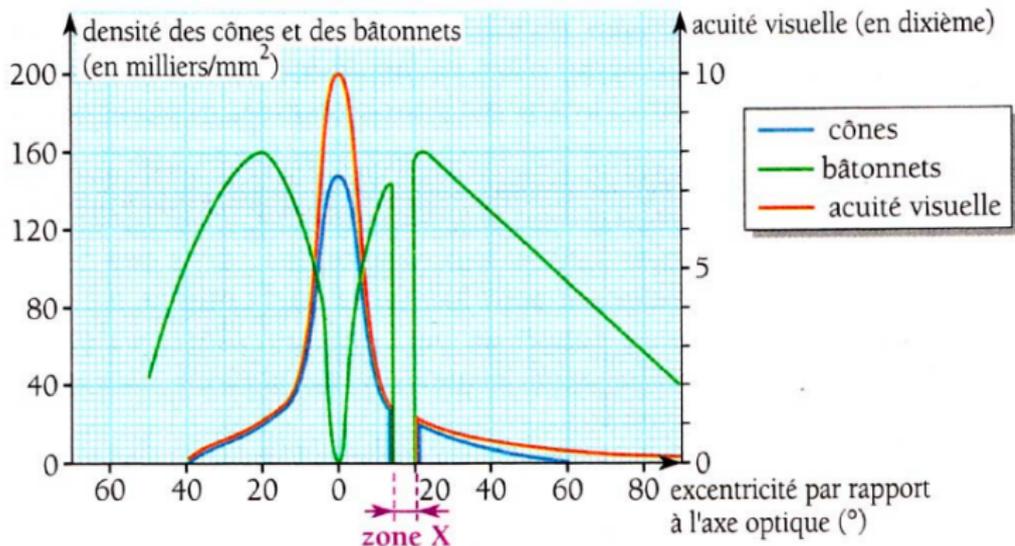
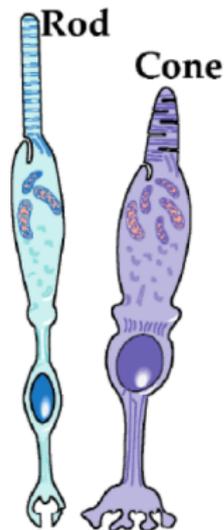


Nerf optique $\simeq 10^6$ fibres pour transporter l'information d'environ 10^8 photorecepteurs... Processus de **COMPRESSION** au niveau des cellules des couches de la rétine.

Cellules de la rétine

Photorécepteurs sur la rétine :

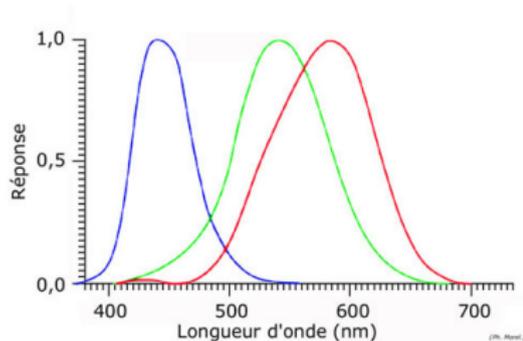
- les **bâtonnets**, très sensibles mais peu précis, liés à la vision nocturne ;
- les **cônes**, plus précis mais beaucoup moins sensibles que les bâtonnets, associés à la perception de la couleur.



Cellules de la rétine

Les cônes sont de trois types, selon leur sensibilité spectrale :

- 1 Pour les cônes de type S (pour "short", 4% des cônes), le maximum de cette sensibilité se situe dans les teintes **bleues-violettes** (440 nm).
- 2 Pour les cônes de type M (pour "medium", 32% des cônes), dans les teintes **vertes** (545 nm).
- 3 Pour les cônes de type L (pour "long", 64% des cônes), dans les teintes **jaunes-rouges** (580 nm).



Sensibilités des cônes M et L supérieure à celle des cônes S : l'oeil répond plus fortement à certaines longueurs d'onde qu'à d'autres, à intensité lumineuse égale. De plus, les cônes S sont distribués sur la périphérie de la fovea.

Sensibilité spectrale de l'oeil normalisée $V(\lambda)$ maximale en $\lambda \simeq 555\text{nm}$ en vision diurne et 500nm en vision nocturne.

Métamérisme

Espace des spectres lumineux infini, mais espace des couleurs perçues tridimensionnel.

Si ρ_s , ρ_m et ρ_l sont les sensibilités spectrales respectives des cônes S, M et L, un spectre $I(\lambda)$ est perçu comme le triplet :

$$(\langle I, \rho_s \rangle, \langle I, \rho_m \rangle, \langle I, \rho_l \rangle),$$

où

$$\langle I, \rho_c \rangle := \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \rho_c(\lambda) I(\lambda) d\lambda.$$

Remarque : un stimulus du spectre visuel, même monochromatique (constitué d'une seule longueur d'onde) produira toujours au moins deux réponses non nulles des cônes. On ne peut donc pas stimuler les cônes séparément (et donc atteindre les triplets élémentaires $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$, $(0, 0, 1)$).

Métamérisme

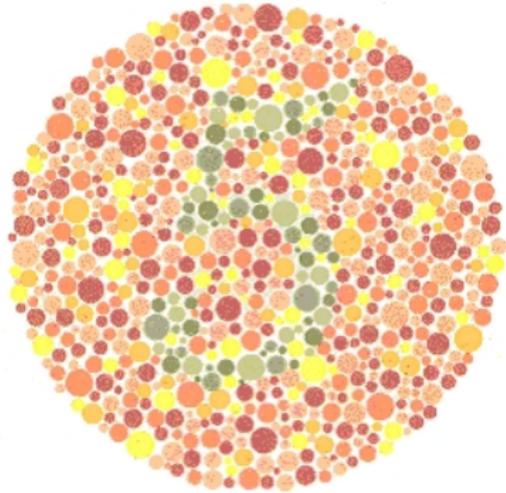
Deux objets de spectres R_1 et R_2 différents apparaissent comme identiques sous un illuminant de distribution I s'ils présentent les mêmes réponses spectrales, c-a-d si :

$$\langle I.R_1, \rho_c \rangle = \langle I.R_2, \rho_c \rangle, \quad \forall c \in \{s, m, l\}.$$

Attention, deux objets peuvent être métamères sous un illuminant donné et pas sous un autre !

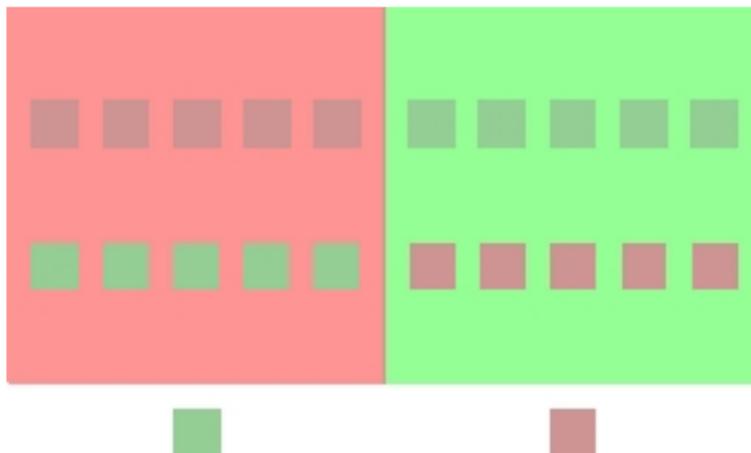
Daltonisme

Il existe différents types d'anomalies visuelles liées à la vision des couleurs. Selon les pigments atteints, on parlera d'achromatisme, de dichromatisme, ou de trichromatisme anormal.



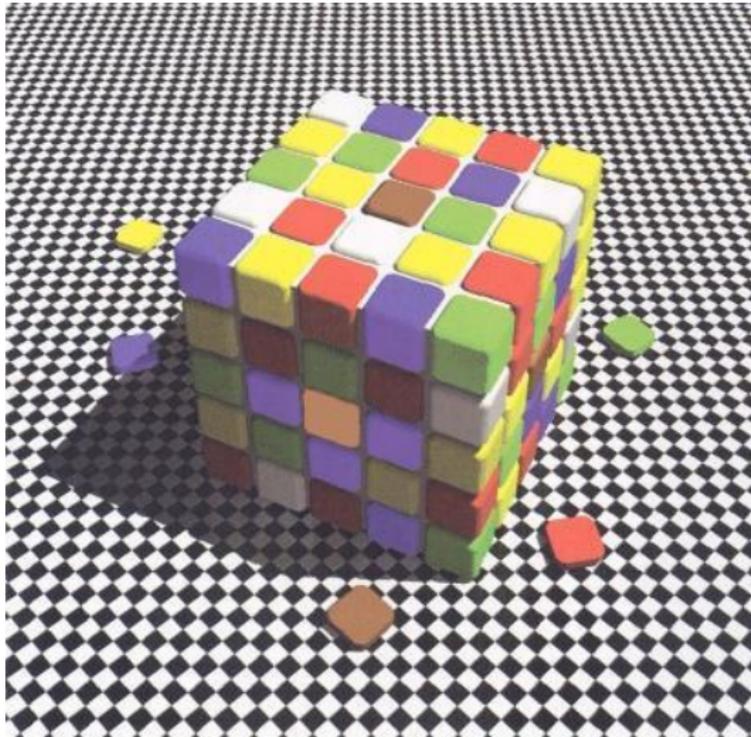
Quelques principes élémentaires de la perception couleur

Sensibilité au contraste local.



Quelques principes élémentaires de la perception couleur

Sensibilité au contraste local.



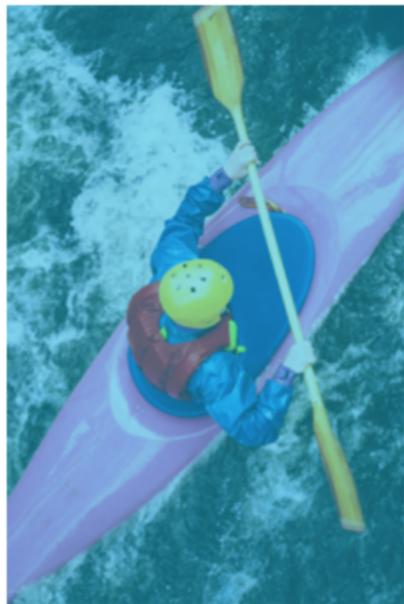
Opposition de couleur

Oppositions rouge / vert et bleu / jaune.

Découvertes par Ewald Hering (1834–1918). Confirmées dans les années 50/60 par la découverte de cellules sensibles aux opposition de couleur dans la rétine et dans le cortex.



Adaptation chromatique



Deuxième partie II

Espaces de représentation des couleurs perçues

Synthèse additive

Principe : reproduire en mélangeant 3 sources de lumière monochromatiques de longueurs d'onde λ_R , λ_G , λ_B fixées, la même sensation de couleur qu'un stimulus $L(\lambda)$ donné.

Lumière synthétisée de spectre

$$S(\lambda) = \bar{r}\delta_{\lambda_R}(\lambda) + \bar{g}\delta_{\lambda_G}(\lambda) + \bar{b}\delta_{\lambda_B}(\lambda)$$

Un Observateur de sensibilités spectrales (ρ_s, ρ_m, ρ_l) mesure (q_s, q_m, q_l) où

$$q_s = \int S(\lambda)\rho_r(\lambda)d\lambda = \bar{r}\rho_s(\lambda_R) + \bar{g}\rho_s(\lambda_G) + \bar{b}\rho_s(\lambda_B),$$

$$q_m = \int S(\lambda)\rho_g(\lambda)d\lambda = \bar{r}\rho_m(\lambda_R) + \bar{g}\rho_m(\lambda_G) + \bar{b}\rho_m(\lambda_B),$$

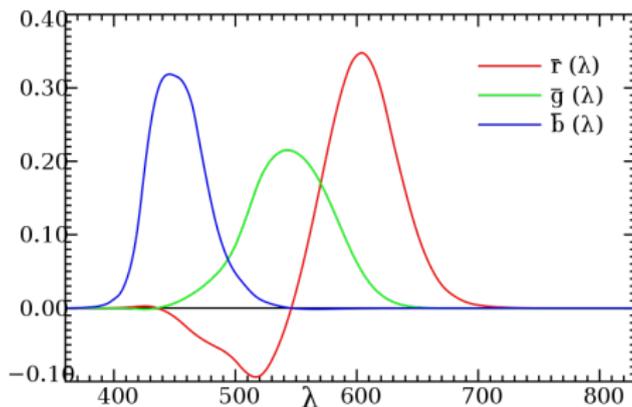
$$q_l = \int S(\lambda)\rho_b(\lambda)d\lambda = \bar{r}\rho_l(\lambda_R) + \bar{g}\rho_l(\lambda_G) + \bar{b}\rho_l(\lambda_B).$$

Pour $L(\lambda) = \delta_{\lambda_0}$ le but est d'obtenir la sensation colorée $(q_s, q_m, q_l) = (\rho_s(\lambda_0), \rho_m(\lambda_0), \rho_l(\lambda_0)) \rightarrow$ coordonnées $(\bar{r}(\lambda_0), \bar{g}(\lambda_0), \bar{b}(\lambda_0))$.

Représentation des couleurs perçues et synthèse additive

Expériences de **Wright puis Guild**, fin des années 20 : cherchent à reproduire à l'aide de 3 sources primaires de longueurs d'ondes λ_B (435nm), λ_G (546nm) et λ_R (700nm) la même sensation de couleur qu'un stimulus monochromatique de longueur d'onde λ .

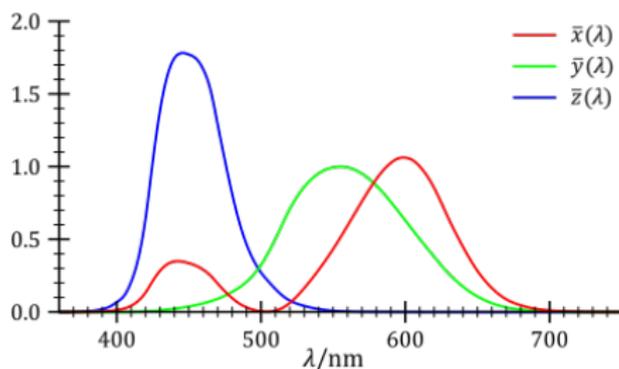
- $S(\lambda) \leftrightarrow \bar{r}(\lambda)\delta_{\lambda_R} + \bar{g}(\lambda)\delta_{\lambda_G} + \bar{b}(\lambda)\delta_{\lambda_B}$,
- combinaison positive pas possible pour toute source monochromatique \rightarrow coordonnées négatives nécessaires.



Wikimedia commons.

Système XYZ CIE 1931 puis 1964

Pour pallier ce défaut, en 1931, la CIE développe un nouvel espace de primaires abstraites dans lequel les coordonnées $(x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda))$ restent positives et où la courbe $y(\lambda)$ correspond à la sensibilité spectrale de l'oeil en vision diurne.



Wikimedia commons.

La lumière de spectre $L(\lambda)$ a dans cet espace les coordonnées

$$(X, Y, Z) \propto \left(\int L(\lambda)x(\lambda)d\lambda, \int L(\lambda)y(\lambda)d\lambda, \int L(\lambda)z(\lambda)d\lambda \right).$$

Diagramme de chromaticité xy

Espace des couleurs XYZ normalisé : $\hat{x} = \frac{X}{X+Y+Z}$, $\hat{y} = \frac{Y}{X+Y+Z}$.
Représente l'ensemble des chromaticités visibles par les humains.

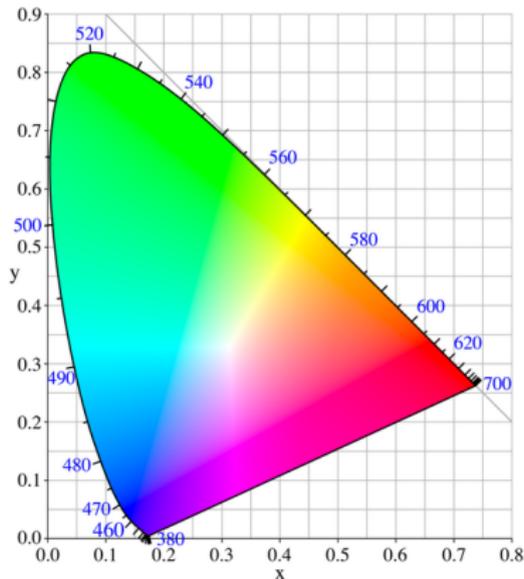


Illustration : [Wikimedia Commons](#)

Remarque : l'ensemble des couleurs du visible (pour les humains) ne peut pas être atteint en mélangeant trois sources !

Blanc

Pas de bonne définition de la lumière blanche : distribution spectrale uniforme ? en longueur d'onde ? en fréquence ?

Différentes définitions de la lumière blanche standardisée :

- D65 (CIE Standard Illuminant), censé correspondre à la lumière naturelle (du ciel) en plein jour en Europe (en moyenne sur les différents jours de l'année) ;
- D50, très utilisé en imprimerie, etc.

Tous ces blancs "standards" sont extrêmement proches de la **courbe de Planck** (corps noir) dans le diagramme de chromaticité xy.

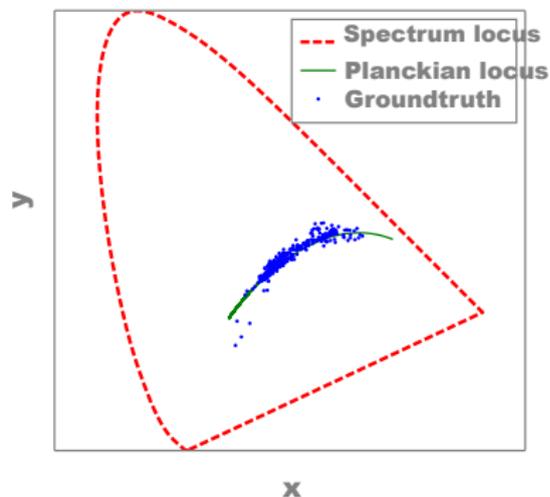
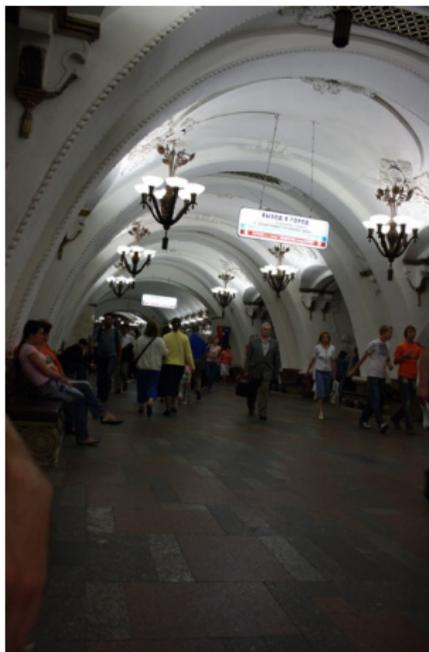
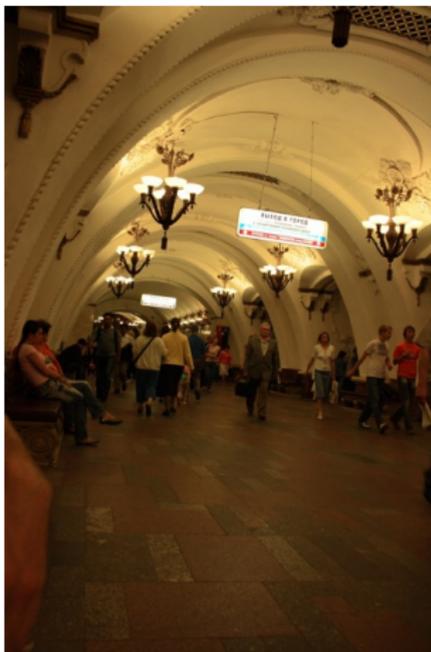


Illustration : Baptiste Mazin.

Balance des Blancs



Balance des blancs : consiste à estimer l'illuminant de la scène et à corriger l'image grâce au modèle diagonal pour en obtenir une représentation sous un illuminant standard.

→ Problème mal posé. Nécessité de faire des hypothèses sur la scène :

- **White patch**, max-RGB : point le plus clair = illuminant ;
- **Gray world** : scène achromatique en moyenne.

Teinte et saturation

On se fixe un point blanc dans le diagramme de chromaticité.

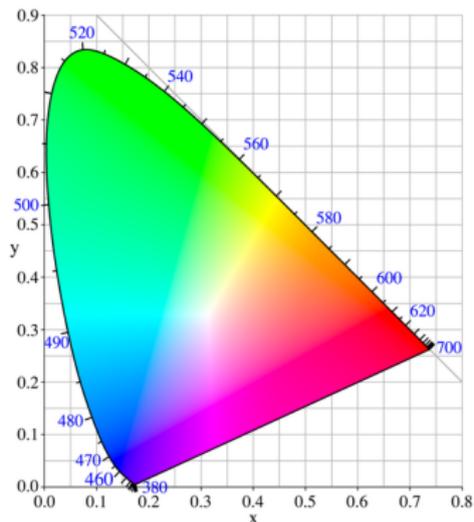


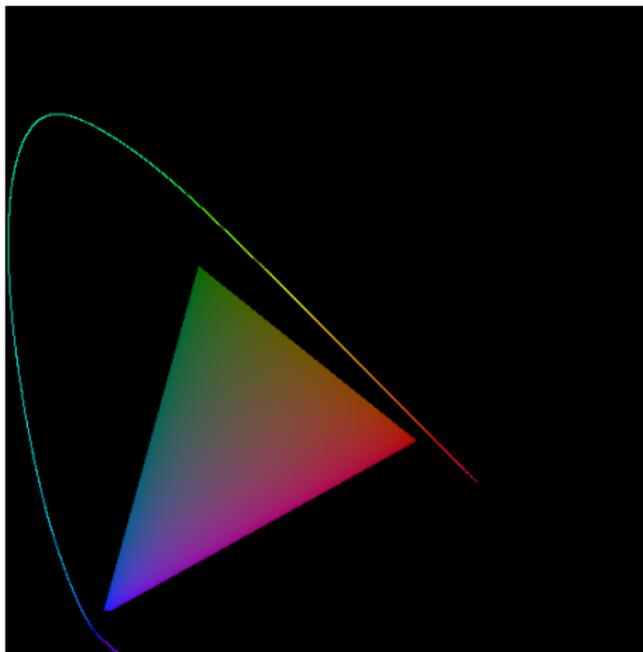
Illustration : Wikimedia Commons

Teinte = dans le diagramme de chromaticité, segment partant du point blanc et rejoignant une couleur monochromatique, ou une couleur "pourpre" (mélange de violet et de rouge).

Saturation = "distance" au point blanc dans le diagramme. Les couleurs les plus éloignées sont les plus saturées.

Restitution des couleurs par un écran : synthèse additive et gamut

Aucun écran ne peut reproduire toutes les couleurs du spectre visible (limites en saturation et en luminosité).



Standards de couleur : sRGB, (le plus utilisé, pour les moniteurs, imprimantes, internet), Adobe RGB, etc.

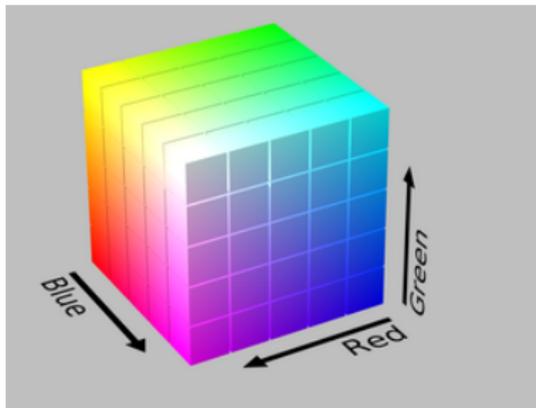
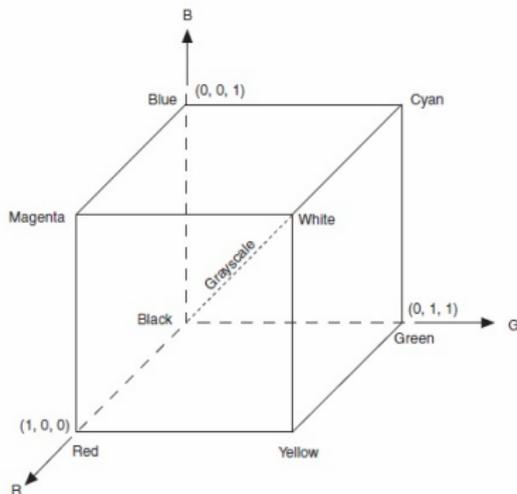
Source : <http://www.madore.org/~david/misc/color/>

Troisième partie III

Espaces couleur classiques

Cube R,G,B

Une fois qu'on s'est donné **trois primaires R, G et B** (par exemple, celles de sRGB) et un **point blanc**, le cube RGB représente l'ensemble des couleurs que l'on peut atteindre par mélange de ces primaires.



Décomposition RGB

Image couleur.



Décomposition RGB

Composante R.



Observation : les trois composantes R, G, B sont très corrélées.

Décomposition RGB

Composante G.



Observation : les trois composantes R, G, B sont très corrélées.

Décomposition RGB

Composante B.

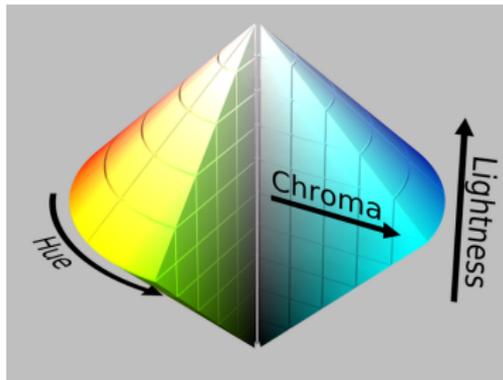


Observation : les trois composantes R, G, B sont très corrélées.

Espaces HSV, HSL, HSI

Espaces de représentation classiques en traitement des images, *computer graphics* etc.

Représentation **cylindrique** ou conique à partir du cube RGB.



- **Luminance L ou valeur V** : aspect clair, foncé ou terne d'un couleur.
- **Teinte H** : attribut de la sensation visuelle qui a suscité les dénominations de couleur.
- **Saturation S** : degré de mélange de la longueur d'onde pure prédominante avec le blanc.

Décomposition HSV d'une image

Image couleur.



Décomposition HSV d'une image

Composante V.



Décomposition HSV d'une image

Composante S.



Décomposition HSV d'une image

Composante H.



Décomposition HSV d'une image

Même image avec forte compression JPEG.



Décomposition HSV d'une image

Composante V.



Décomposition HSV d'une image

Composante S.



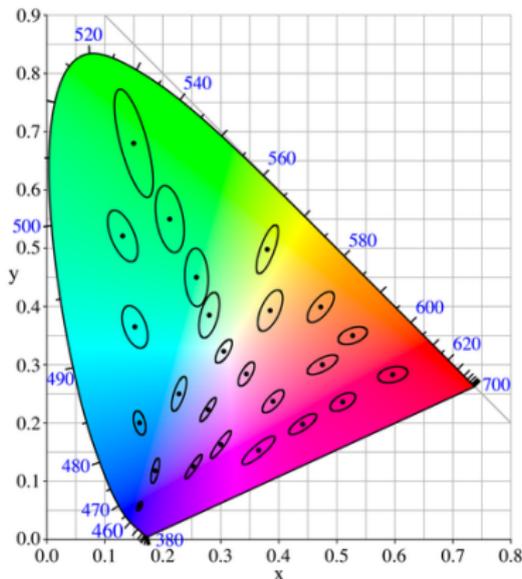
Décomposition HSV d'une image

Composante H.



Non uniformité de la perception aux écarts de couleur dans l'espace XYZ

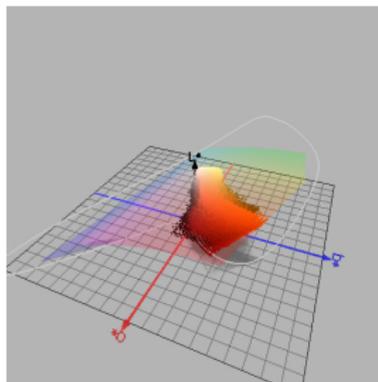
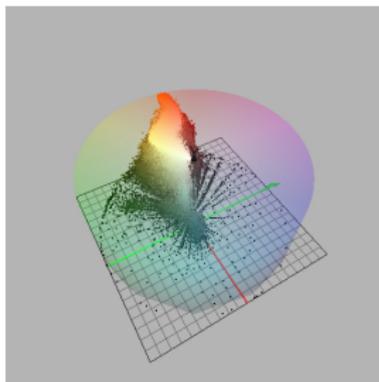
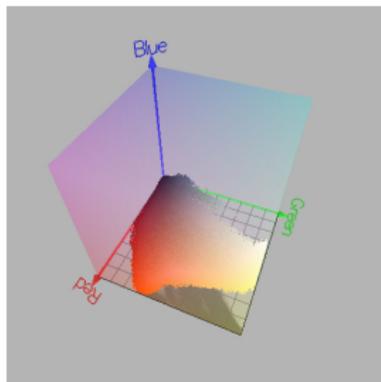
Expériences dans les années 40 : ellipses de Macadam.



Espace CIELab (1976) créé pour que les distances entre couleurs proches correspondent mieux à la perception de l'écart entre ces couleurs.

- L représente la **luminance**,
- a, b représentent la chrominance et sont construits sur deux oppositions de couleurs : le rouge et le vert, le bleu et le jaune.

Histogrammes couleurs dans différents espaces

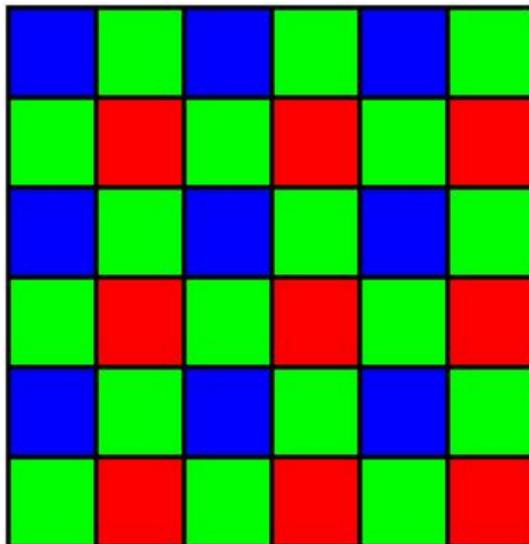


Quatrième partie IV

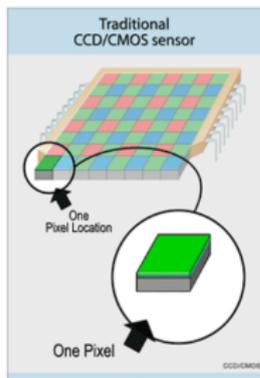
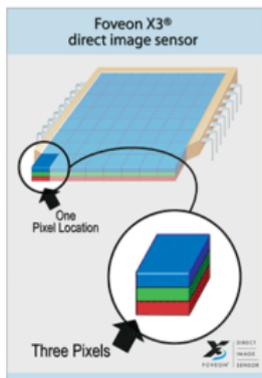
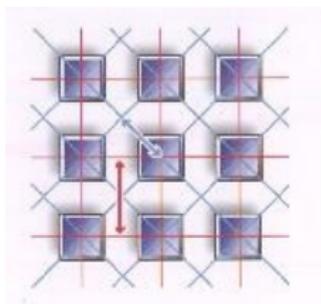
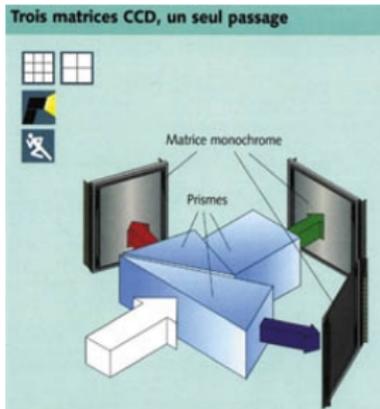
Capteurs couleur et Détramage

Capteurs couleur

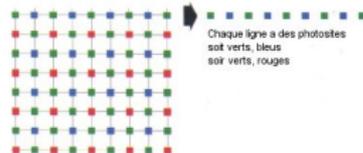
Capteur CCD : trame de Bayer ou Bayer color filter array (CFA), 1976.



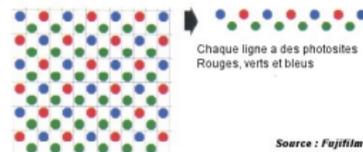
Capteurs couleur alternatifs



Conventional CCD



Super CCD



Source : Fujifilm

Trame de Bayer

Exemple d'image obtenue par la trame de Bayer (par ex. fichier RAW d'un reflex numérique).



Fichier RAW (12 bits) compressé sans perte



Fichier TIFF ou JPEG 24

bits.

interpolation

Trame de Bayer

Interpolation possible



Fichier RAW (12 bits) compressé sans perte



interpolation

Fichier TIFF ou JPEG 24

bits.

Interpolation bilinéaire



→ satisfaisant dans les régions homogènes mais lissage des bords et textures et apparition de fausses couleurs, en particulier près des bords ou des zones hautes fréquences présentant des motifs complexes (interpolation naïve d'images aliasées).

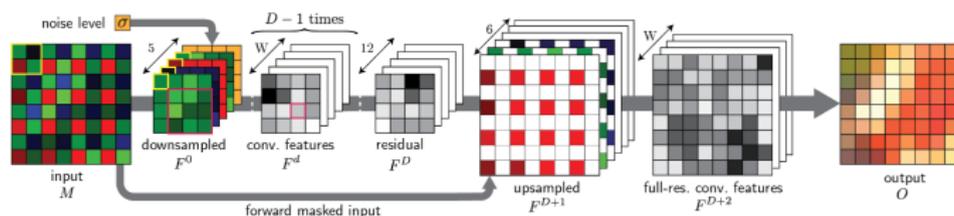
Algorithmes de détramage

Algorithmes classiques.

- interpolent d'abord la composante verte à l'aide de tous les pixels connus, en privilégiant certaines directions (estimation de dérivée par des schémas discrets)
- interpolent ensuite b/g et r/g

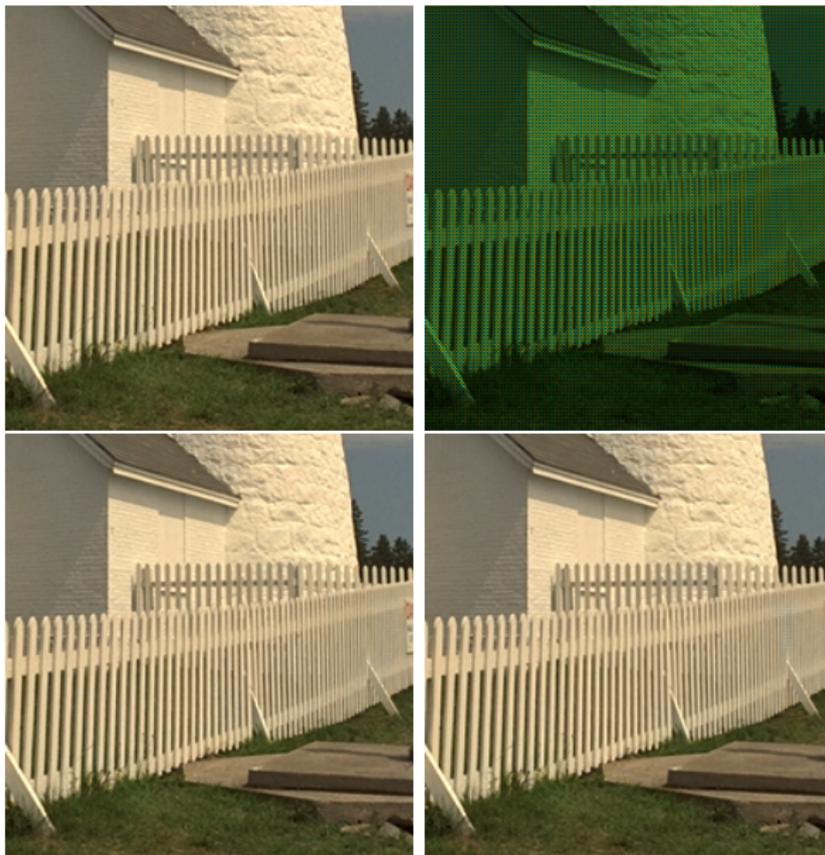
Cok (1986), Hibbard (1995), Hamilton et Addams (1997), Kimmel (1999), Hirakawa et Paks (2005), Buades et al. (2007), Kiku et al. (2014), etc...

Apprentissage profond Plus rapides et résultats nettement supérieurs aux méthodes classiques.



[Gharbi et al. TOG 2016], [Tan et al. 2017]...

Exemples de résultats



[Gharbi et al. TOG 2016], [Tan et al. 2017]

Essayez par vous-mêmes : <https://www.ipol.im/pub/art/2019/274/>